

В. С. ПЕТРУШИН, Ю. Р. ПЛОТКИН, Р. Н. ЕНОКТАЕВ, БЕНДАХМАН БУХАЛФА

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ПЕРЕМЕЖАЮЩЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ

Рассматривается электропривод, включающий в себя кроме асинхронного короткозамкнутого двигателя, согласующий редуктор. Нагрузку привода определяет заданная циклограмма, представляющая собой изменение нагрузочных моментов во времени. Улучшение эксплуатационных характеристик электропривода обеспечивается за счёт оптимизационного перепроектирования двигателя. В качестве критериев оптимизации используются среднециклические коэффициенты полезного действия и мощности. Выполнен анализ энергетических, тепловых, механических и виброакустических показателей двигателей при работе на заданную циклограмму нагрузки.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, циклограмма нагрузки, редуктор, математическая модель, среднециклические критерии, коэффициент энергетической эффективности, тепловое состояние, виброакустические показатели, механическое состояние.

В. С. ПЕТРУШИН, Ю. Р. ПЛОТКИН, Р. М. ЕНОКТАЕВ, БЕНДАХМАН БУХАЛФА

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ ПЕРЕМЕЖОВАНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ

Розглядається електропривод, що включає в себе крім асинхронного короткозамкнутого двигуна, узгоджувальний редуктор. Навантаження приводу визначає задана циклограма, що представляє собою зміну навантажувальних моментів у часі. Поліпшення експлуатаційних характеристик електроприводу забезпечується за рахунок оптимізаційного перепроєктування двигуна. В якості критеріїв оптимізації використовуються середньодіапазонні коефіцієнти корисної дії і потужності. Виконано аналіз енергетичних, теплових, механічних та віброакустичних показників двигунів при роботі на задану циклограму навантаження.

Ключові слова: асинхронний двигун, циклограма навантаження, редуктор, математична модель, середньодіапазонні критерії, коефіцієнт енергетичної ефективності, тепловий стан, віброакустичні показники, механічний стан.

V. S. PETRUSHYN, J. R. PLOTKIN, R. N. YENOKTAEV, BENDAHMANE BOUKHALFA

DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE FOR INTERMITTENT OPERATION

The purpose of this work is the development of energy-efficient asynchronous electric drive for intermittent operation mode by using algorithms for modeling the dynamic modes of induction motors in drives with matching reducers. A motor drive is considered, which includes, in addition to an short-circuited induction motor, a matching reducer. The load of the drive is determined by a given cyclogram, which is a change in the load moments in time. Taken into account the inconstancy of the equivalent circuit parameters of the engine associated with the change in the magnetic circuit saturation and displacement current in the rotor winding, and the availability of higher spatial harmonics in the magnetic field. The purpose is achieved by improving the performance of the electric drive, which is provided by optimizing engine redesign, based on algorithms for modeling dynamic operating modes of the drive. A methods is proposed in which the average cyclic efficiency and power factors are used as optimization criteria. They are determined by the dependencies of the drive efficiency and motor power factor, which are found for the cycle in question, taking into account dynamic modes, with the addition of electrical losses taking into account the main and additional losses in the magnetic circuit, mechanical and additional. The dynamic characteristics of the consume currents and powers by the basic and optimized motors are obtained and compared. The greatest effect (the energy efficiency ratio, which is the product of the engine power factor and the efficiency of the engine and matching reducer, rises from 0,528 to 0,613) is achieved with two-criterion optimization with weighting coefficient of criteria 0,5. The simulation of the thermal state of the motors was carried out and the overheating temperatures of the stator windings of the basic and optimized motors were determined. The mechanical indicators, which characterize the mechanical state of the motors, are compared. The analysis of vibroacoustic indicators of the engines was performed when operating for a given load cyclogram: vibration speed and vibration acceleration of magnetic origin, vibration velocity of mechanical origin, ventilation and magnetic noise.

Keywords: induction motor, load cyclogram, reducer, mathematical model, average-cyclic criteria, energy efficiency coefficient, thermal state, vibroacoustic indicators, mechanical condition.

Введение. Повсеместное использование асинхронных электроприводов во всех отраслях промышленности, сельского хозяйства и на транспорте ставит задачу их разработки с повышенными энергетическими показателями, что в условиях постоянного роста стоимости энергоресурсов даст существенный экономический эффект. Энергосбережение с помощью привода будет также способствовать уменьшению техногенного воздействия на окружающую среду, повышению ресурса работы привода. В ряде случаев в состав асинхронных электроприводов (ЭП) могут входить редукторы, согласующие моменты двигателей и нагрузок. При этом эксплуатационные характеристики такого привода во многом определяются параметрами редукторов [1,2,3,4].

Нагрузочный момент на валу асинхронного двигателя (АД), как правило, меняется по величине во времени, что характеризуется перемежающимся режимом работы и описывается соответствующей циклограммой.

Надёжной и экономичной работе электропривода в течение определённого ресурса времени будет способствовать максимальное приближение его эксплуатационных характеристик к требованиям потребителей. В силу этого при разработке энергоэффективного асинхронного электропривода должен приниматься во внимание перемежающийся режим работы и проектирование АД должно быть основано на рассмотрении динамических режимов работы [5,6,7].

Цель работы. Разработка энергоэффективного асинхронного электропривода для перемежающегося режима работы с использованием алгоритмов моделирования динамических режимов работы асинхронных двигателей в приводах с согласующими редукторами.

Методы исследования. Эффективность преобразования электрической энергии в электроприводе может быть определена исходя выражения активной мощности на механизме:

$$P_{\text{mech}} = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{IM} \cdot \eta_{IM} \cdot \eta_{\text{red}},$$

где I_1 – потребляемый приводом ток из трехфазной сети переменного тока с линейным напряжением U_1 ; $\cos \varphi_{IM}$, η_{IM} – коэффициенты мощности и КПД асинхронного двигателя, η_{red} – КПД редуктора.

Тогда коэффициент энергетической эффективности определяется как:

$$k_{\text{ee}} = P_{\text{mech}} / \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = \cos \varphi_{IM} \cdot \eta_{IM} \cdot \eta_{\text{red}}.$$

Включение редуктора в ЭП при рассмотрении статических режимов учитывается следующим образом:

$$n_{\text{mech}} = \frac{n}{i_{\text{red}}}; \quad M_{\text{mech}} = M_{IM} \cdot i_{\text{red}} \cdot \eta_{\text{red}};$$

$$P_{\text{mech}} = P_{IM} \cdot \eta_{\text{red}}; \quad \eta_{ED} = \eta_{IM} \cdot \eta_{\text{red}},$$

где i_{red} – передаточное число редуктора, n_{IM} и n_{mech} – частоты вращения двигателя и механизма; M_{IM} и M_{mech} – моменты на валу двигателя и на механизме; P_{IM} и P_{mech} – полезные механические мощности на валу двигателя и на механизме.

Исследования переходных электромагнитных и электромеханических процессов в асинхронных двигателях, основаны на системе нелинейных дифференциальных уравнений равновесия напряжений и токов в системе преобразованных координат [7,8]:

$$\frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha} = u_{s\alpha}(t) - r_s d(t) [x_r(t) \Psi_{s\alpha}(t) - x_M(t) \Psi_{r\alpha}(t)];$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{s\beta} = u_{s\beta}(t) - r_s d(t) [x_r(t) \Psi_{s\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{r\beta}(t)];$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha} = \left[p \omega_r \cdot \Psi_{r\alpha}(t) - r_r(t) d(t) \left[x_s(t) \Psi_{r\alpha}(t) - x_M(t) \Psi_{s\alpha}(t) \right] \right];$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{r\beta} = \left[p \omega_r \cdot \Psi_{r\beta}(t) - r_r(t) d(t) \left[x_s(t) \Psi_{r\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{s\beta}(t) \right] \right];$$

$$\frac{d \omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left\{ \frac{3p}{2} d(t) x_M(t) \left[\Psi_{s\beta}(t) \Psi_{r\alpha}(t) - \Psi_{r\beta}(t) \Psi_{s\alpha}(t) \right] - \frac{M_L(\omega_r)}{i_{\text{red}} \cdot \eta_{\text{red}}} \right\},$$

где $\Psi_{s\alpha}(t)$, $\Psi_{s\beta}(t)$, $\Psi_{r\alpha}(t)$ и $\Psi_{r\beta}(t)$ – потокосцепления статорных и роторных обмоток машины, соответственно по осям α и β ; ω_r – угловая частота вращения ротора двигателя; p – число пар полюсов; J – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя; M_L – зависимость момента сопротивления механизма от времени; r_s , $r_r(t)$, $x_s(t)$, $x_r(t)$, $x_M(t)$ – активные и полные реактивные сопротивления обмоток статора

и ротора и сопротивление взаимной индукции, причем все они, за исключением r_s изменяются на каждом шаге интегрирования; $d(t)$ – вспомогательная переменная: $d(t) = [x_s(t) \cdot x_r(t) - (x_M(t))^2]^{-1}$; $u_{s\alpha}(t)$ и $u_{s\beta}(t)$ – мгновенные значения напряжений по осям α и β , которые определяются амплитудой напряжения U_m и угловым положением обобщенного вектора напряжения φ_1 :

$$u_{s\alpha}(t) = U_m(t) \cdot \cos \varphi_1; \quad u_{s\beta}(t) = U_m(t) \cdot \sin \varphi_1.$$

Выражения, связывающие мгновенные значения токов и потокосцеплений:

$$i_{s\alpha}(t) = d(t) \cdot [x_r(t) \Psi_{s\alpha}(t) - x_M(t) \Psi_{r\alpha}(t)];$$

$$i_{s\beta}(t) = d(t) \cdot [x_r(t) \Psi_{s\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{r\beta}(t)],$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – токи статора по осям α и β .

Значение тока статора:

$$i_1(t) = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [i_{s\alpha}(t)^2 + i_{s\beta}(t)^2]}.$$

Математическая модель (ММ), построенная на базе вышеописанных дифференциальных уравнений, позволяет провести расчёты частот вращения, токов в фазах обмоток, электромагнитных моментов, потерь.

В каждом из уравнений имеют место нелинейные коэффициенты – параметры двигателя, изменяющиеся в каждой рабочей точке, в том числе и вследствие явления насыщения магнитной системы и вытеснения тока в обмотке ротора [9]. Один из подходов к анализу динамических характеристик АД предполагает предварительное определение этих коэффициентов для необходимых рабочих точек. Поэтому до анализа переходного процесса проводятся расчёты установившихся режимов с целью получения значений всех параметров схемы замещения с учётом вытеснения тока в обмотке ротора и насыщения магнитопровода для необходимых рабочих точек. Для этого используются ММ установившихся режимов. При расчётах динамических режимов учитываются изменения на каждом шаге интегрирования системы, т.е. в определённых точках характеристики перехода от одного момента нагрузки к другому, параметров схемы замещения. При реализации такого подхода обеспечивается повышение уровня адекватности ММ.

Потребляемая двигателем условная мгновенная активная мощность в динамических режимах при условии синусоидального напряжения питания рассчитывается через мгновенные значения ортогональных составляющих напряжений и токов:

$$p_1'(t) = \frac{3}{2} \cdot [u_{s\alpha}(t) \cdot i_{s\alpha}(t) + u_{s\beta}(t) \cdot i_{s\beta}(t)].$$

Реальная мгновенная потребляемая активная мощность p_1 больше условной на величину суммы неучтенных потерь (основных в магнитопроводе $\Delta p_{\text{lossbas}}$, добавочных в магнитопроводе $\Delta p_{\text{lossadd}}$, механических Δp_{mech} , добавочных Δp_{add}):

$$p_1(t) = p_1'(t) + \Delta p_{\text{lossbas}}(t) + \Delta p_{\text{lossadd}}(t) + \Delta p_{\text{mech}}(t) + \Delta p_{\text{add}}(t).$$

Мгновенная мощность на валу двигателя может быть определена через потокосцепления и токи с использованием значения частоты вращения ротора:

$$p_{IM}(t) = \omega \frac{3p}{2} [i_{r\beta}(t)\Psi_{r\alpha}(t) - i_{r\alpha}(t)\Psi_{r\beta}(t)] - \Delta p_{mech}(t) - \Delta p_{add}(t).$$

Мгновенное значение КПД определяется отношением мгновенных значений полезной мощности на валу двигателя p_{IM} к потребляемой активной мощности p_1 . В качестве критериев при разработке энергоэффективных ЭП используются среднециклические энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности) и при их расчёте принимаются во внимание их значения в переходных режимах работы:

$$\eta_{acED} = \frac{1}{t_{end} - t_{start}} \int_{t_{start}}^{t_{end}} \eta_{ED}(t) dt,$$

$$\cos \varphi_{acIM} = \frac{1}{t_{end} - t_{start}} \int_{t_{start}}^{t_{end}} \cos \varphi_{IM}(t) dt.$$

Обобщенный критерий, учитывающий в качестве составляющих вышеперечисленные критерии с соответствующими коэффициентами значимости, может быть применён при двухкритериальной оптимизации.

Результаты численного моделирования. На кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета была разработана программа DIMDrive аналогичная программе DIMASDrive [10], с помощью которой представляется возможным спроектировать асинхронный двигатель для энергоэффективного электропривода. Системный принцип позволяет учесть наличие определённых возможных компонентов электропривода. В состав комплексной проектной модели наряду с моделями АД (для установившегося режима основанной на Т – образной схеме замещения, для динамического режима – на системе дифференциальных уравнений обобщённой машины) входит и модель нагрузочной диаграммы $M(t)$, а также, при необходимости, модель, согласующего величины момента двигателя и момента нагрузки, редуктора. Модели двигателя предполагают рассмотрение машин различных конструктивных исполнений, степеней защиты, систем вентиляции, типов роторов и т.д. и учитывают изменение параметров схем замещения двигателя вследствие насыщения стали магнитопровода и вытеснения токов в обмотках двигателя, наличие основных и добавочных потерь в стали в статических и динамических режимах работы двигателя, наличие высших пространственных гармоник магнитного поля. Предусмотрен анализ электромагнитных, электромеханических, энергетических, тепловых процессов при работе АД на различные по величине и режиму работы нагрузки.

Программа DIMDrive была использована для разработки энергоэффективного электропривода для перемещающегося режима работы с согласующим редуктором при решении такой производственной задачи.

Нагрузка описывается циклограммой на рис. 1.

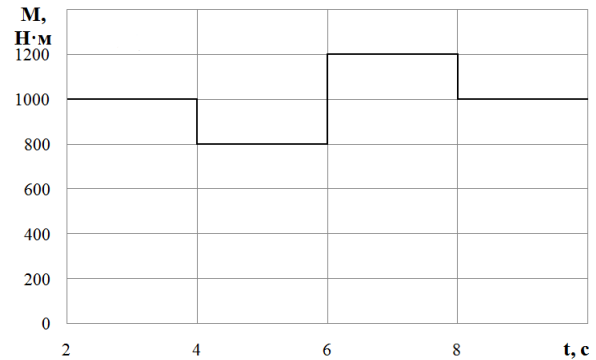


Рис. 1. Нагрузочная циклограмма
2 с – 800 Н·м, 2 с – 1200 Н·м, 4 с – 1000 Н·м

Электропривод питается от сети с напряжением 380 В и частотой 50 Гц и имеет согласующий редуктор с передаточным числом $i_{red} = 20$ и $\eta_{red} = 0,8$.

При решении оптимизационных задач в качестве варьируемых параметров были выбраны длина пакета статора двигателя (L), коэффициента изменения магнитного потока (k_{cf}). Изменения k_{cf} предполагает автоматическое изменение числа витков (w_1), сечения эффективного проводника (q_{eff}), диаметра обмоточного провода (d_w). В качестве базового используется серийный асинхронный двигатель 4A160S4. Было осуществлено двухкритериальное оптимизационное проектирование модификаций базового асинхронного двигателя: в первом случае в скалярной свертке использовались вышеупомянутые критерии с коэффициентами значимости, равными единице (опыт 1, табл. 1), во втором – с коэффициентами значимости равными 0,5 (опыт 2, табл. 1). Результаты оптимизации и конструктивные изменения базового двигателя, соответствующие рассматриваемым оптимизациям, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнение показателей различных ЭП

Двигатель Параметры	Базовый	Оптимизированный	
		Опыт 1	Опыт 2
η_{acIM} , о.е.	0,858	0,875	0,875
η_{acED} , о.е.	0,769	0,7	0,7
$\cos \varphi_{acIM}$, о.е.	0,686	0,871	0,876
k_{eeED} , о.е.	0,528	0,61	0,613
L , мм	130	153,9	151,5
k_{cf} , о.е.	1	1,06	1,1
w_1	112	119	123
q_{eff} , мм ²	2,454	2,313	2,24
d_w , мм	1,33	1,28	1,24

Динамические характеристики, представляющие собой зависимости изменения электрических, энергетических величин во времени на входе двигателя, представлены на рис. 2 ÷ 5. Характеристики представлены для базового варианта привода и его лучшей модификации. Программа DIMDrive позволяет при рассмотрении динамических характеристик исключать из рассмотрения пусковой режим, что и сделано в дальнейшем.

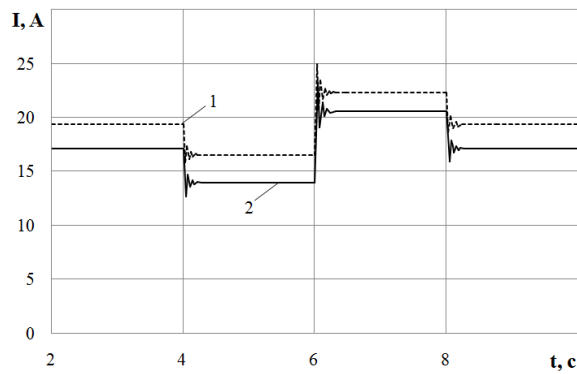


Рис. 2. Зависимости потребляемых токов: 1 – с базовым двигателем; 2 – с оптимизированным двигателем

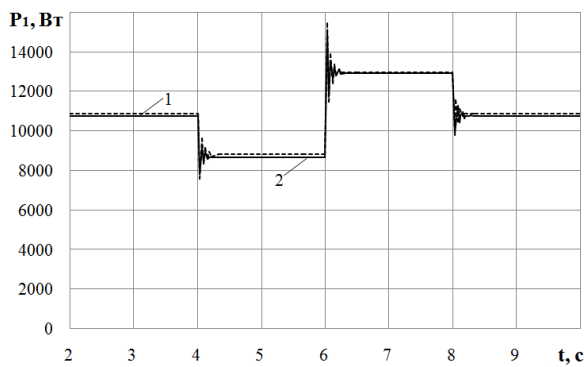


Рис. 3. Зависимости потребляемых активных мощностей: 1 – с базовым двигателем; 2 – с оптимизированным двигателем

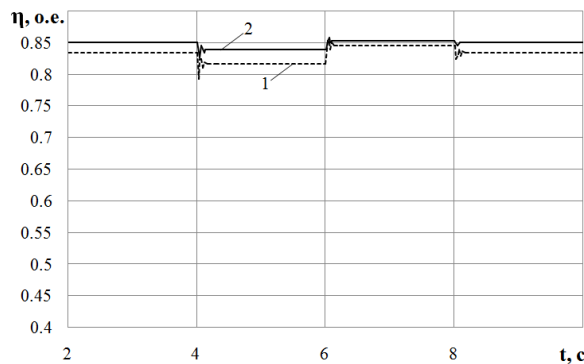


Рис. 4. Зависимости КПД: 1 – с базовым двигателем; 2 – с оптимизированным двигателем

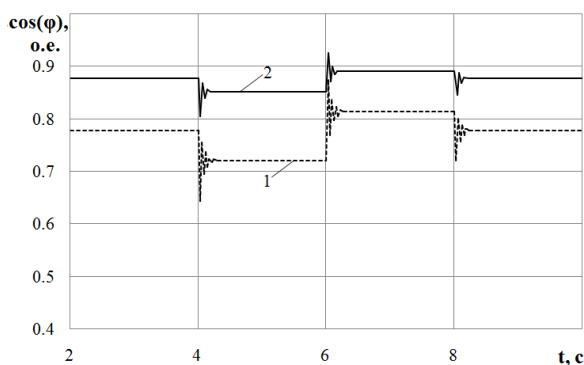


Рис. 5. Зависимости коэффициента мощности: 1 – с базовым двигателем; 2 – с оптимизированным двигателем

Наряду с представленными характеристиками целесообразно рассмотреть тепловые показатели, к числу которых относятся превышения температур различных частей ЭМ над температурой охлаждающей среды. Нагрев конкретного АД зависит от условий окружающей среды, величины потерь в её конструктивных элементах, интенсивности отвода тепла из этих элементов. Поэтому тепловой расчёт должен производиться с использованием геометрических и физических данных ЭМ и информации о потерях в различных частях двигателя, полученной в результате электромагнитного расчёта двигателя. Вопросам анализа теплового состояния АД посвящены многочисленные работы [8, 11, 12, 13, 14]. Допустимая температура нагрева обмоток ограничивается классом нагревостойкости применяемых изоляционных материалов.

В практике исследований и проектирования АД для анализа теплового состояния широкое применение нашёл метод эквивалентных тепловых схем замещения (ЭТС). Он основывается на хорошо разработанной теории электрических и тепловых цепей и позволяет определять средние температуры частей АД. К достоинствам этого метода относятся возможность его использования при различных конструктивных исполнениях двигателей, возможность повышения точности расчёта за счёт увеличения числа элементов эквивалентной тепловой схемы и уточнения значений тепловых проводимостей. При расчёте принимаются следующие упрощения: короткозамкнутый ротор учитывается как один элемент, охлаждение торцевых поверхностей сердечников статора, ротора не учитывается, охлаждение машины симметрично и равномерно в поперечном сечении, тепловые проводимости независимы от температуры. При формировании ММ теплового состояния двигателя должно быть учтено разнообразие конструктивных решений регулируемых АД. При заданной циклограмме, имеющей малые продолжительности ступеней, температура перегрева обмотки статора практически не меняется. В силу этого представляется возможным оценить тепловое состояние на основании теплового расчёта для установившегося режима, используя усреднённый нагрузочный момент циклограммы. ЭТС для тепловых расчётов установившихся режимов АД закрытого исполнения (IP44, IP54) представлена на рис. 6.

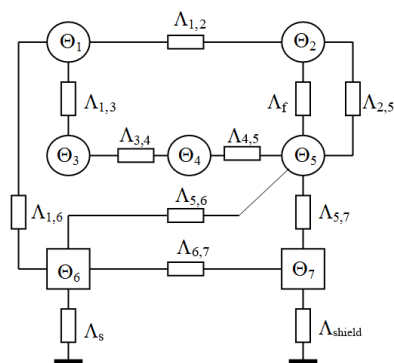


Рис. 6. Эквивалентная тепловая схема замещения АД закрытого исполнения (IP44, IP54) для анализа установившихся тепловых процессов

При решении задачи определения превышения температур различных конструктивных частей электрической машины над температурой окружающей среды в рассматриваемую эквивалентную схему замещения включены следующие конструктивные части асинхронного двигателя:

1. Сердечник статора (зубцы и спинка) со средней температурой перегрева θ_1 и потерями ΔP_1 (магнитными потерями в сердечнике с учётом добавочных потерь в стали статора);
2. Короткозамкнутая клетка ротора и зубцы ротора со средней температурой перегрева θ_2 и потерями ΔP_2 (суммой потерь в стержнях ротора, короткозамкнутых кольцах и добавочных потерь в зубцах и обмотке ротора);
3. Пазовая часть обмотки статора со средней температурой перегрева θ_3 и потерями ΔP_3 ;
4. Лобовые части обмотки статора со средней температурой нагрева θ_4 и потерями $\Delta P_4 = \Delta P_{el2} - \Delta P_3$;
5. Внутренний воздух (ВВ) со средней температурой θ_5 и внутренними вентиляционными потерями ΔP_5 ;
6. Станина со средней температурой перегрева θ_6 ;
7. Подшипниковые щиты со средней температурой θ_7 .

В эквивалентной тепловой схеме замещения представлены следующие тепловые проводимости:

Λ_1 – проводимость между пакетом статора и охлаждающей средой при бескорпусном исполнении.

$\Lambda_{1,2}$ – проводимость воздушного зазора между сердечником статора и ротором.

$\Lambda_{1,3}$ – проводимость изоляции пазовой части обмотки от меди обмотки к сердечнику статора.

$\Lambda_{1,5} = \Lambda_{rvds} + \Lambda_{avds} + \Lambda_{surf}$ – проводимость от пакета статора к ВВ, состоит из проводимостей: Λ_{rvds} радиальных, Λ_{avds} аксиальных вентиляционных каналов статора, Λ_{surf} поверхности сердечника статора к ВВ;

$\Lambda_{1,6}$ – проводимость от пакета статора к станине (для закрытых АД);

$\Lambda_{2,5}$ – проводимость от ротора к охлаждающему воздуху (продуваемый ротор);

Λ_f – проводимость от лобовых частей беличьей клетки к ВВ;

$\Lambda_{2,5} = \Lambda_{rvdr} + \Lambda_{avdr} + \Lambda_{shaft}$ – проводимость от активной зоны ротора к внутреннему воздуху, состоит из проводимостей Λ_{rvdr} радиальных, Λ_{avdr} аксиальных вентиляционных каналов ротора к ВВ, Λ_{shaft} проводимости ротора к ВВ через вал.

$\Lambda_{3,4}$ – аксиальная тепловая проводимость обмотки статора;

$\Lambda_{3,5}$ – проводимость от пазовой части обмотки статора к ВВ через радиальные каналы;

$\Lambda_{4,5}$ – проводимость от лобовых частей обмотки статора к ВВ;

Λ_5 – эквивалентная проводимость, учитывающая подогрев охлаждающей среды (для защищённых двигателей);

$\Lambda_{5,6}$ – проводимость от ВВ к обдуваемой станине;

$\Lambda_{5,7}$ – проводимость от ВВ к подшипниковым щитам;

$\Lambda_{6,7}$ – проводимость между станиной и подшипниковыми щитами;

Λ_s – проводимость от поверхности станины к охлаждающему воздуху;

Λ_{shield} – проводимость от подшипниковых щитов к охлаждающему воздуху.

Тепловые проводимости между элементами машины определяются процессами теплопередачи, и их величины зависят от свойств материалов, характера теплообмена, геометрических размеров машин, количества и свойств охлаждающей среды.

На основании предложенной эквивалентной тепловой схемы замещения может быть составлена система уравнений, решение которых представляет собой перегревы элементов АД. Обобщённую систему уравнений для рассматриваемых случаев целесообразно представить в матричной форме.

Вектор перегревов конструктивных элементов θ определяется в результате решения уравнения:

$$[\theta] = [\Lambda]^{-1} \cdot [\Delta P],$$

где $[\Lambda]$ – матрица проводимостей, $[\Delta P]$ – вектор греющих потерь в соответствующем элементе:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \Sigma \Lambda_1 & -\Lambda_{1,2} & -\Lambda_{1,3} & 0 & -\Lambda_{1,5} & -\Lambda_{1,6} & 0 \\ -\Lambda_{1,2} & \Sigma \Lambda_2 & 0 & 0 & -\Lambda_{2,5} & -\Lambda_{n2} & 0 \\ -\Lambda_{1,3} & 0 & \Sigma \Lambda_3 & -\Lambda_{3,4} & -\Lambda_{3,5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Lambda_{3,4} & \Sigma \Lambda_4 & -\Lambda_{n1} & 0 & 0 \\ -\Lambda_{1,5} & -\Lambda_{2,5} & -\Lambda_{n2} & -\Lambda_{3,5} & \Sigma \Lambda_5 & -\Lambda_{5,6} & -\Lambda_{5,7} \\ -\Lambda_{1,6} & 0 & 0 & 0 & -\Lambda_{5,6} & \Sigma \Lambda_6 & -\Lambda_{6,7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Lambda_{5,7} & -\Lambda_{6,7} & \Sigma \Lambda_7 \end{bmatrix},$$

где $\Sigma \Lambda_i$ – элементы главной диагонали матрицы Λ :

$$[\Sigma \Lambda] = \begin{bmatrix} \Lambda_{1,2} + \Lambda_{1,3} + \Lambda_{1,5} + \Lambda_{1,6} + \Lambda_{6k} \\ \Lambda_{1,2} + \Lambda_{n2} + \Lambda_{2,5} + \Lambda_{np} \\ \Lambda_{1,3} + \Lambda_{3,4} + \Lambda_{3,5} \\ \Lambda_{3,4} + \Lambda_{n1} \\ \Lambda_{n2} + \Lambda_{2,5} + \Lambda_{1,5} + \Lambda_{n1} + \Lambda_{5,6} + \Lambda_{5,7} + \Lambda_{3,5} + \Lambda_b \\ \Lambda_{1,6} + \Lambda_{5,6} + \Lambda_{6,7} + \Lambda_s \\ \Lambda_{5,7} + \Lambda_{6,7} + \Lambda_{shield} \end{bmatrix},$$

$$[\Delta P] = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad [\theta] = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix}.$$

На рис. 7 представлены расчётные температуры перегревов обмоток статоров θ базового и оптимизированного двигателей, работающих в установившемся режиме на усреднённый нагрузочный момент 1000 Нм.

Исходя из рис. 7 и класса нагревостойкости изоляции рассматриваемых двигателей “В”, можно утверждать, что работоспособность двигателей в тепловом отношении обеспечивается. Кроме того, следует отметить, что на механизме число оборотов практически одинаковое.

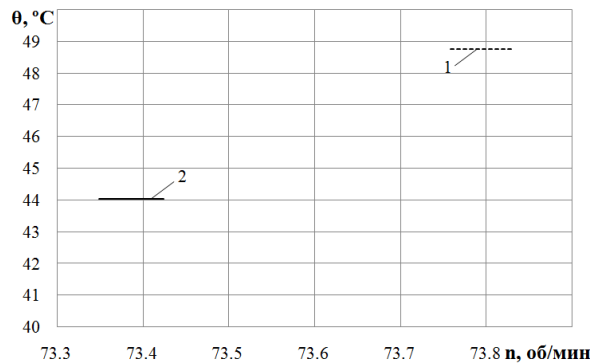
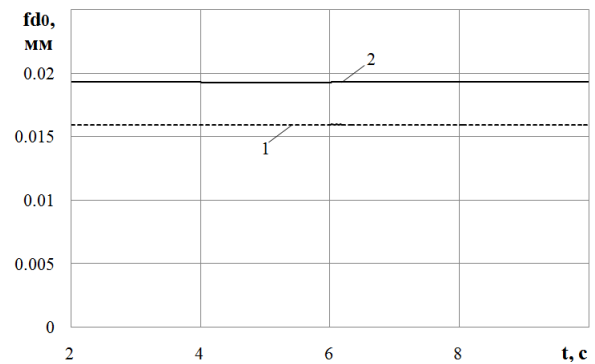


Рис. 7. Температуры перегревов обмоток статора:
1 – базовый двигатель; 2 – оптимизированный двигатель

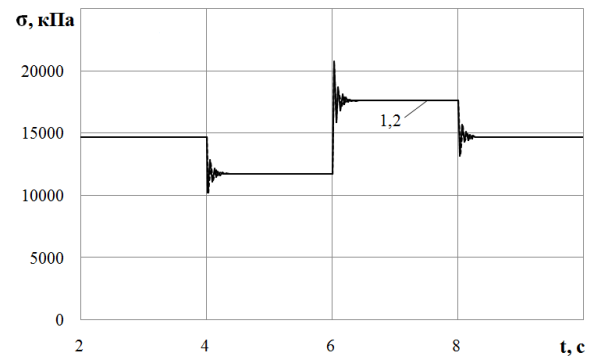
При механических расчётах АД в установившихся режимах работы рассматриваются три фактора, характеризующие механическое состояние: жёсткость вала, прочность вала и динамическая грузоподъёмность подшипников [12, 13]. Для оценки механического состояния АД в динамических режимах работы предлагается рассмотреть эти же факторы в соответствии с заданной циклограммой.

При расчёте вала на жёсткость определяющим является механический показатель – результирующий прогиб вала f_{do} . Кроме основного прогиба вала, зависящего от масс активной стали ротора и короткозамкнутой обмотки, наблюдается, значение которого пропорционально вращающему моменту АД. Прогиб вала вызывают также силы одностороннего магнитного притяжения, которые возникают при смещении ротора. Можно рассчитать величины прогиба вала, используя в известном алгоритме [13] значения вращающих моментов АД, изменяющиеся на протяжении неустановившегося режима соответственно заданной циклограмме. При расчёте вала на прочность определяется приведенное механическое напряжение σ , учитывающее совместное действие напряжений изгиба и кручения. Используя изменяющиеся на протяжении значения вращающих моментов АД, определяется приведенное механическое напряжение при работе на заданную циклограмму. Определение изменений расчётной динамической грузоподъёмности подшипников C_b выполняется аналогично с учётом типа подшипника и характера нагрузки двигателя. Разработанные математические модели использованы в расчётной программе, с помощью которой были выполнены исследования механического состояния двигателя при работе на заданную циклограмму. При анализе принято сочленения двигателей с исполнительными механизмами с помощью упругих муфт. В исследуемых ЭМ используются шарикоподшипники. При исследованиях принят характер нагрузки с умеренными толчками. Используется коэффициент перегрузки, равный 2,5 для реверсивных машин. На рис. 8 а, б, в представлены соответственно результаты расчётов вышеперечисленных механических показателей при работе на заданную циклограмму.

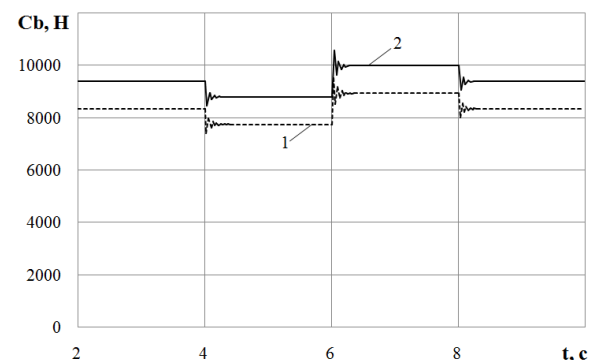
Большой прогиб вала у оптимизированного двигателя по сравнению с прогибом базового свидетельствует о меньшей жесткости вала оптимизируемого.



а



б



в

Рис. 8. Результирующий прогиб вала (а);
приведенное механическое напряжение (б);
динамическая грузоподъёмность подшипника (в):
1 – базовый двигатель; 2 – оптимизированный двигатель

Однако у обоих двигателей результирующие прогибы не превышают допустимых значений, равных 10 % воздушного зазора. Приведенное механическое напряжение для обоих двигателей практически одинаково и не превышает предела текучести используемой для изготовления вала стали. Расчётная динамическая грузоподъёмность подшипников у оптимизированного двигателя больше аналогичного показателя базового двигателя, но оба значения не превышают допустимой грузоподъёмности используемых подшипников.

Причинами вибрации и шума электрических машин являются силы магнитного, механического и аэродинамического происхождения.

Магнитные источники вибрации и шума связаны с высшими пространственными и временными гармоническими магнитного поля, которые обусловлены наличием зубцов на статоре и на роторе, эксцентриситетом воздушного зазора, несинусоидальным распределением МДС обмотки, насыщением магнитной цепи машины и рядом других причин. К механическим источникам относятся небаланс ротора, несоосность и перекос посадочных мест подшипника, отклонения в форме их колец и разброс размеров сепаратора, тепловая деформация ротора, прогиб вала и т.д. Аэродинамические шумы создаются вентилятором и другими расположенными на роторе деталями. Шумы и вибрации АД рассматривались многими авторами [14, 15].

Системный подход, согласно которому все функциональные показатели, включая и виброшумовые, определяются при совместном рассмотрении работы всех входящих в привод компонентов (двигателей, редукторов, нагрузок), позволяет сформировать комплексные ММ виброакустических процессов АД. Расчёт виброакустических показателей магнитного происхождения может быть выполнен по методике, разработанной Ю.А. Шумиловым и В.Г. Герасимчуком [15], согласно которой силы магнитного происхождения делятся в зависимости от направления действия на радиальные и тангенциальные; вибрации и шумы определяются от этих составляющих. Основным допущением является предположение о линейности механической системы, при которой частота магнитных вибраций и шумов равна частоте вызывающих её магнитных сил, а амплитуда деформаций вычисляется делением силы, действующей с данной частотой, на жесткость конструкции (с учётом усиления деформаций при резонансе). Конечным результатом расчётов является совокупность амплитуд вибраций на соответствующих частотах (спектр вибрации) и общий уровень магнитного шума. В результате виброакустического расчёта определяются следующие виброшумовые параметры: относительный уровень виброскорости S_v и уровень магнитного шума S_n , зависящий от виброскорости и относительной мощности излучения N_{rel} . При расчёте используются геометрические размеры и свойства материалов АД, а также величины диаметров сердечника статора, корпуса, толщины стенки статора и корпуса, модули упругости материалов статора и корпуса и т. д.

Данная методика может быть использована для определения виброакустических показателей в динамических режимах. Для этого необходимо использовать переменные на каждом шаге решения системы уравнений значения электромагнитных и электромеханических величин в виброакустическом расчёте.

На рис. 9 представлены расчётные зависимости виброскорости $S_v = f(t)$, виброускорения $S_a = f(t)$ и магнитного шума $S_n = f(t)$, полученные для рассматриваемых АД при работе на заданную циклограмму нагрузок.

Методика расчёта вентиляционного шума серийных АД хорошо отработана и подтверждена экспериментальными данными [13].

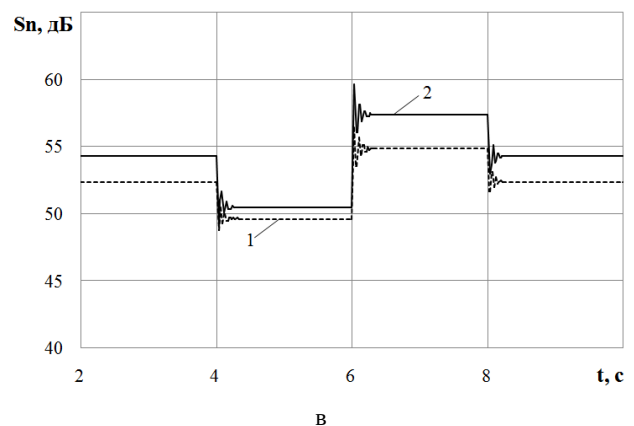
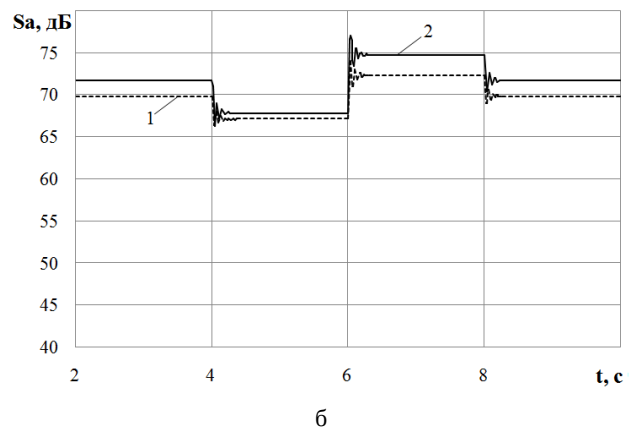
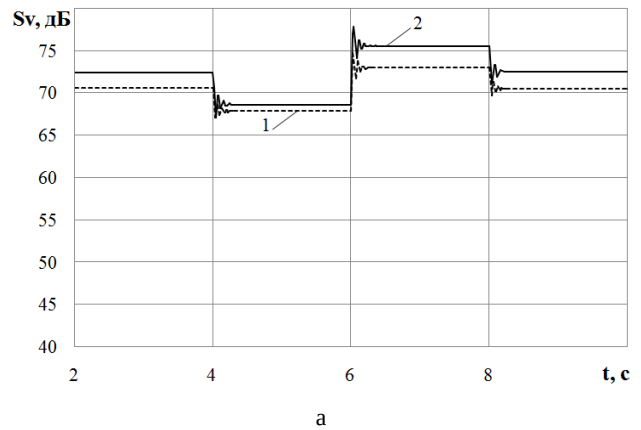


Рис.9. Виброскорость (а); виброускорение (б); магнитный шум (в) двигателей: 1 – базовый двигатель; 2 – оптимизированный двигатель

В асинхронных двигателях применяются центробежные вентиляторы с различными конструкциями лопаток. Особенности конструкции лопаток учитываются введением в исходные данные геометрических размеров используемых вентиляторов. Относительная подача вентилятора представляет собой отношение фактической подачи вентилятора к максимальной подаче и определяется аэродинамическим КПД, который в свою очередь зависит от конструкции лопаток центробежного вентилятора. Уровень вентиляцион-

ного шума определяется для различных конструкций по разным формулам с использованием коэффициентов, значения которых принимаются по таблицам.

В АД при работе на заданную циклограмму частота вращения вентилятора незначительно изменяется, что обуславливает практически постоянство аэродинамического шума. Общий уровень вентиляционного шума зависит также от типа вентилятора и его конструктивных размеров. Значения этого шума в заданных диапазонах регулирования по известной методике могут быть определены с помощью программного комплекса для рассматриваемых вариантов АД [13]. В динамических режимах вентиляционный шум пропорционален частоте вращения, устанавливаясь на значениях, соответствующих стационарному режиму на каждой ступени рассматриваемой циклограммы (рис. 10). Значения вентиляционного шума для двух рассматриваемых двигателей практически одинаковы.

Известная методика расчёта механических вибраций для обычных асинхронных короткозамкнутых двигателей [13] предназначена для жёстких роторов, к которым относятся роторы АД единых серий. Причинами механических вибраций являются остаточный дисбаланс при статической и динамической балансировке ротора и наличие подшипников качения.

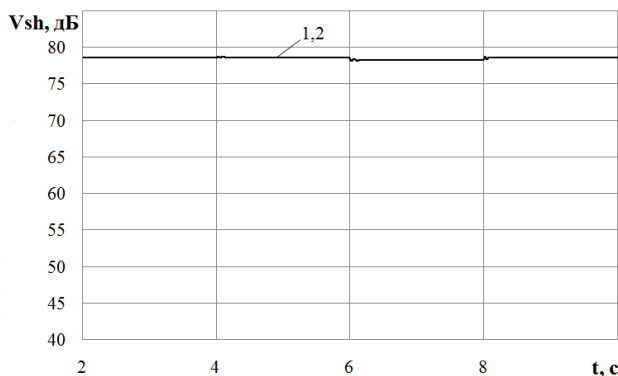
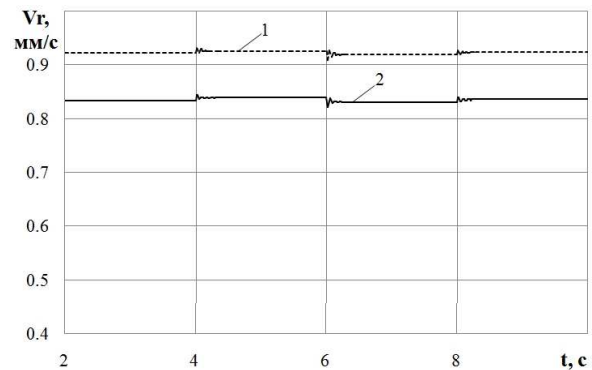


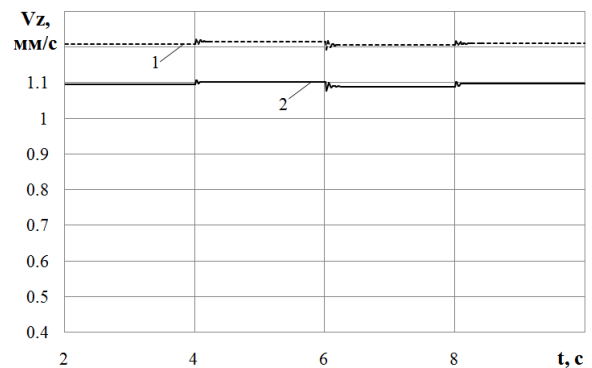
Рис. 10. Изменения вентиляционного шума АД:
1 – базовый двигатель; 2 – оптимизированный двигатель

При расчёте вибраций от подшипников качения предполагается, что на низких частотах причиной вибраций являются несовершенство изготовления подшипника по главным размерам и неточность монтажа, а на частотах выше 3-кратной частоты вращения – несовершенство микрогеометрии подшипников, причём уровни вибраций максимальны на частотах собственных колебаний ротора. Подшипниковые вибрации имеют существенный технологический разброс, определяемый качеством подшипников, а также конструкцией и технологией изготовления двигателей. Показатели механических вибраций зависят от масс ротора и машины, а также от частоты вращения. Конечным результатом расчёта механических вибраций являются: общий уровень виброскорости от небаланса и несовершенства подшипников в радиальном направлении V_r , общий уровень виброскорости от небаланса и несовершенства подшипников в осевом направлении V_z .

Максимальные значения показателей механических вибраций при работе на заданную циклограмму нагрузки в конкретных проектных вариантах могут быть определены по известной методике с помощью разработанного программного комплекса для сопоставления этих вариантов (рис. 11).



а



б

Рис. 11. Виброскорость в радиальном направлении (а); виброскорость в осевом направлении (б): 1 – базовый двигатель; 2 – оптимизированный двигатель

Значения показателей механических вибраций определяются вращающимися массами двигателя и частотой вращения ротора и зависят от дисбаланса, несовершенства изготовления подшипников и неточности монтажа.

По окончании переходных режимов устанавливаются значения, соответствующие стационарным режимам. Расчёты показателей механической вибрации выполнены при задании неточностей обработки, балансировки и несовершенства изготовления подшипников равными 1 мкм.

Оптимизированный двигатель имеет меньшие значения виброскоростей как в радиальном, так и в осевом направлениях.

Выводы. 1. Разработана программа DIMDrive, позволяющая анализировать динамические режимы работы асинхронных двигателей, в том числе в системах электроприводов с согласующими редукторами и являющаяся базой для проектирования двигателей для различных режимов работы;

2. Для сопоставления энергоэффективности рассматриваемых электроприводов предлагаются среднечисловые коэффициенты энергетической эффективности, которые учитывают соответствующие показатели как в установившихся, так и в переходных режимах;

3. Адекватность математического моделирования динамических режимов АД повышается, если принимаются во внимание неучтенные потери, а именно в магнитопроводе, добавочные, механические;

4) Наибольший коэффициент энергетической эффективности (повышается с 0,528 до 0,613) достигается при двухкритериальном оптимизационном проектировании с коэффициентами значимости обоих критериев 0,5;

5) Выполненный тепловой расчёт подтвердил допустимые значения перегревов обмоток статоров базового и оптимизированного двигателей над температурой окружающей среды;

6) Анализ механического состояния двигателей определил соответствие механических показателей требованиям стандартов;

7) Виброакустические расчёты показали, что вибрационные показатели магнитной и механической природ, а также акустические показатели магнитной и аэродинамической природ для двух рассматриваемых двигателей отличаются незначительно.

Список литературы

1. Rojas-Moreno A. Parameter extraction of an induction motor with gearbox for dynamic simulation. *Proceedings of the IEEE ANDESCON*. Arequipa, Peru, 2016, pp. 1 – 4. DOI: 10.1109/ANDESCON.2016.7836207.
2. Zhao C., Ren Z., Zhou X., Wen B. The Online Monitoring of the Dynamic Characteristics for an Induction Motor and Gearbox Transmission System. *Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Computing, Information and Control*. Kumamoto, Japan, 2007, pp. 532 – 532. DOI: 10.1109/ICICIC.2007.582.
3. Evon S., Schiferl R. Direct- drive induction motors: using an induction motor as an alternative to a motor with reducer. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2005. Vol. 11, № 4. pp. 45 – 51. DOI: 10.1109/MIA.2005.1458276.
4. Бушер В. В., Савич С. П., Савич С. Л., Медведев В. С. Автоматизована система порівняння техніко-економічної ефективності електроприводів кранових механізмів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків: НПП ЧП «Технологічний Центр». 2016, Т. 2, № 8 (80). С. 37 – 49. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66784.
5. Nyein Nyein Soe, Thet Thet Han Yee, Soe Sandar Aung. Dynamic Modeling and Simulation of Three-phase Small Power Induction Motor. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008. № 42. pp. 421 – 424.
6. Вербовой А. П., Вербовой П. Ф. Проблемы моделирования переходных электромагнитных процессов в асинхронных машинах. *Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Проблеми сучасної електротехніки*. Київ: ІЕД НАНУ. 2004, Ч.2. С. 65 – 70.
7. Копылов И. П. *Математическое моделирование электрических машин*. Москва: Высшая школа, 2001. 327 с.
8. Петрушин В. С. *Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: учебное пособие*. Одесса: Наука и техника, 2006. 320 с.
9. Петрушин В. С., Бендахман Бухалфа, Якимец А. М., Каленик О. В. Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на динамические характеристики регулируемых асинхронных двигателей. *Електротехніка і електромеханіка*. Харків: НТУ «ХПІ». 2010, №2. С. 21 – 23.
10. Петрушин В. С., Рябинин С. В., Якимец А. М. Программный продукт «DIMASDrive». Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода. Патент UA, № 4065, 2001.
11. Борисенко А. И., Костиков О. Н., Яковлев А. И. *Охлаждение промышленных электрических машин*. URL: <https://www.twirpx.com/file/288611/>. (дата обращения 02.06.2019).
12. Гольдберг О. Д., Гурич Я. С., Свириденко И. С. *Проектирование электрических машин*. Москва: Высшая школа, 2001. 430 с.
13. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. *Проектирование электрических машин: учебник для студ. высш. учеб. завед.* Москва: Высшая школа, 2005. 767 с.
14. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / В. И. Радин, Й. Лондин, В. Д. Розенкоп [и др.]. URL: <https://www.twirpx.com/file/774694/>. (дата обращения 04.06.2019).
15. Шумилов Ю. А., Герасимчук В. Г. Исследование магнитных возмущающих сил асинхронного двигателя при питании от статического преобразователя частоты. *Технічна електродинаміка*. Київ: ІЕД НАНУ. 1997, № 4. С.44 – 48.

References (transliterated)

1. Rojas-Moreno A. Parameter extraction of an induction motor with gearbox for dynamic simulation. *Proceedings of the IEEE ANDESCON*. Arequipa, Peru, 2016, pp. 1 – 4. DOI: 10.1109/ANDESCON.2016.7836207.
2. Zhao C., Ren Z., Zhou X., Wen B. The Online Monitoring of the Dynamic Characteristics for an Induction Motor and Gearbox Transmission System. *Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Computing, Information and Control*. Kumamoto, Japan, 2007, pp. 532 – 532. DOI: 10.1109/ICICIC.2007.582.
3. Evon S., Schiferl R. Direct- drive induction motors: using an induction motor as an alternative to a motor with reducer. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2005, vol. 11, № 4. pp. 45 – 51. DOI: 10.1109/MIA.2005.1458276.
4. Busher V. V., Savich S. P., Savich S. L., Medvedev V. S. *Avtomatizovana sistema porivnyannia tekhniko- ekonomichnoi efektyvnosti elektroprivodiv kranovikh mekhanizmiv* [Automated system of comparison of technical and economic efficiency of electric drives of crane mechanisms]. *Skhidno-Evropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. Kharkiv: NPP ChP «Tekhnolohichniy Tsentr». 2016, T. 2, № 8 (80). pp. 37 – 49. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66784.
5. Nyein Nyein Soe, Thet Thet Han Yee, Soe Sandar Aung. Dynamic Modeling and Simulation of Three-phase Small Power Induction Motor. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008, № 42. pp. 421 – 424.
6. Verbovoi A. P., Verbovoi P. F. *Problemy modelirovaniia perekhodnykh elektromagnitnykh protsessov v asinkhronnykh mashinakh* [Problems of modeling of transient electromagnetic processes in asynchronous machines]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vyp. Problemy suchasnoi elektrotekhniki* [Technical electrodynamics. Thematic issue Problems of modern electrical engineering]. Kyiv: IED NANU. 2004, Ch.2. pp. 65 – 70.
7. Kopylov I. P. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moskva: Vysshaya shkola, 2001. 327 p.
8. Petrushin V. S. *Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode: uchebnoe posobie* [Asynchronous motors in a regulated electric drive: teaching manual]. Odessa: Nauka i tekhnika, 2006. 320 p.

9. Petrushin V. S., Bendahman Buhalfa, YAkimec A. M., Kalenik O. V. *Vliyanie nasyscheniya stali magnitoprovoda i vytesneniya toka v obmotke rotora na dinamicheskie harakteristiki reguliruemih asinhronnyh dvigatelej* [Influence of magnetic core steel saturation and rotor current displacement on dynamic characteristics of adjustable-speed induction motors]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electrical engineering & Electromechanics]. Kharkiv: NTU «KhPI». 2010, №2. pp. 21 – 23.
10. Petrushin V. S., Rjabinin S. V. and Iakimets' A. M. *Programmnyy produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnyh korotkozamknutyh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprivoda* ["DIMASDrive" software product. program performance analysis, selection and design of asynchronous motors short-regulated electric drive systems]. Patent UA, № 4065, 2001.
11. Borisenko A. I., Kostikov O.N., Iakovlev A.I. *Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin* [Industrial Electrical Machine Cooling]. URL: <https://www.twirpx.com/file/288611/>. (accessed 02.06.2019).
12. Gol'dberg O. D., Gurin YA. S., Sviridenko I. S. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moskva: Vysshaya shkola, 2001. 430 p.
13. Kopylov I. P., Klovov B. K., Morozkin V. P., Tokarev B. F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. Zaved* [Design of electrical machines: textbook for university students]. Moskva: Vysshaya shkola, 2005. 767 p.
14. Radin V. I., Londin J., Rozenkop V. D. et al. *Unificirovannaya seriya asinhronnyh dvigatelej Interelektro* [Unified series of induction motors Interelectro]. URL: <https://www.twirpx.com/file/774694/>. (accessed 04.06.2019).
15. SHumilov YU. A., Gerasimchuk V. G. *Issledovanie magnitnyh vozmushchayushchih sil asinhronnogo dvigatelya pri pitanii ot staticheskogo preobrazovatelya chastoty* [Investigation of magnetic disturbing forces of an induction motor powered by a static frequency converter]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamics]. Kyiv: IED NANU. 1997, № 4. pp. 44 – 48.

Поступила 24.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петрушин Віктор Сергійович (Петрушин Виктор Сергеевич, Petrushyn Viktor Sergeevich) – доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри електричних машин; м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0003-2659-126X; e-mail: victor_petrushin@ukr.net

Плоткін Юрій Романович (Плоткин Юрий Романович, Plotkin Yuriy Romanovich) – кандидат технічних наук, професор, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin, Professur für Elektrotechnik; м. Берлін, Німеччина; ORCID: 0000-0001-9257-5933; e-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de

Єноктаєв Ростислав Миколайович (Еноктаев Ростислав Николаевич, Yenoktaiev Rostislav Nikolaievich) – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, асистент кафедри електричних машин; м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0003-1577-9822; e-mail: rostik-enok@ukr.net

Бендахман Бухалфа (Бендахман Бухалфа, Bendahmane Boukhalfa) – доктор технічних наук, професор, Université Abderrahmane Mira, Senior Lecturer Class A, Directeur de laboratoire de recherche en Génie Electrique; м. Беджая, Алжир; ORCID: 0000-0002-5626-0093; e-mail: bouxalfa_fr@yahoo.fr